Economic Council
of Canada

Conseil économique
du Canada

Working Paper
Document de travail

Document de travail nº 11

Détérioration du capital environnemental et méthodes de comptabilité nationale

John M. Hartwick

1990

ISSN 1180–3495

92-05327/

Détérioration du capital environnemental et méthodes de comptabilité nationale

Les résultats de ce document demeurent l'entière responsabilité de l'auteur et, en tant que tels, n'ont pas reçu l'adhésion des membres du Conseil économique du Canada.

Table des matières

Remerciements	**vii**
Avant-propos	**ix**
Résumé	**xi**
Introduction	**1**
Théorie du capital et pollution : un modèle de base	**2**
Un monde ricardien pollué avec moyens de lutte contre la pollution conçus par l'homme	**6**
Dépréciation économique du capital environnemental	**7**
Le PNN et la dépréciation économique du capital environnemental	**8**
Désutilité de la pollution	**10**
Annexe : Peskin au sujet de la comptabilité et de la pollution	**13**
Notes	**15**
Bibliographie	**17**

Graphiques

1	Solution d'état stationnaire possible étant donné un stock de pollution constant, c'est-à-dire où les nouvelles hausses de pollution sont égales à la quantité éliminée par la nature	3
2	Un cycle perpétuel possible d'expansion-contraction de la pollution à partir du modèle simple de Ricardo	5

Remerciements

Je remercie deux lecteurs du Conseil pour leurs commentaires utiles et leurs questions intéressantes.

Avant-propos

Le présent document établit un cadre mathématique et théorique rigoureux permettant de prendre en compte l'« environnement naturel » en tant que stock de capital durable. Les principes qu'il énonce sont riches de conséquences pour la mesure de la détérioration (et de l'amélioration) du capital environnemental en vue du calcul « ajusté » du produit national net et de son taux de croissance. Il s'agit d'une étude essentiellement théorique, dont il reste à rendre « opérationnelles » les diverses propositions.

Cette étude constitue une première contribution aux recherches prévues par le Conseil sur les problèmes de l'environnement. Son auteur, John M. Hartwick, est professeur d'économique à l'Université Queen's de Kingston (Ontario).

Judith Maxwell
Présidente

Résumé

La théorie du capital appliquée à l'environnement, qui est considéré comme un stock périssable assorti d'un flux de services de dépollution, est explorée dans un modèle ricardien simple comportant la production de blé et la production de pollution comme produit dérivé inévitable. Nous examinons ensuite comment la comptabilité nationale figure implicitement dans les modèles de la théorie du capital ou de la théorie de la croissance et comment on peut dégager des formules pour tenir compte du gaspillage du capital environnemental (bassins atmosphériques et hydrographiques) découlant d'une utilisation « abusive ».

Introduction

Pour tenir compte de la détérioration de l'environnement dans les comptes nationaux, nous utilisons une méthode fondée sur la théorie du capital. En gros, l'environnement est considéré comme une ressource renouvelable (voir Dasgupta [1982] pour une analyse de cette méthode). L'environnement (bassins atmosphériques et hydrographiques) « élimine » les résidus ou les polluants à un taux qui est fonction de la taille de l'environnement ou de sa qualité en tant que stock produisant un flux physique de services. À des tailles différentes de stock ou de capital environnemental correspondent des quantités ou des volumes différents de flux de services de dépollution. Le gaspillage ou la détérioration de l'environnement s'exprime par une diminution de la taille du stock ou du capital environnemental. Une mesure évidente de la taille du stock environnemental est le volume de polluants en suspension dans l'environnement chaque année. La diminution du stock de capital correspond alors à un accroissement du volume des résidus qui demeurent dans l'environnement. Cette approche de la théorie du capital s'écarte de la question traditionnelle posée en analyse statique, laquelle consiste à chercher le meilleur moyen d'atteindre un niveau cible x de pollution. Cependant, dans notre analyse, le niveau « cible » est atteint de façon endogène par l'interaction dynamique de la « technologie » produisant la pollution et de la « production » de moyens de lutte contre la pollution, soit par la nature elle-même, soit par la nature aidée par l'intervention humaine. Nous observons effectivement un écart entre les valeurs fictives des intrants, incluant la détérioration marginale de l'environnement causée par leur utilisation, et les prix des intrants sur le marché. Dans notre modèle, nous retrouvons donc l'écart habituel à combler par des taxes optimales, mais nous passons rapidement sur cet aspect pour nous concentrer plutôt sur les expressions ou les formules correctes destinées à évaluer le gaspillage du capital ou des stocks environnementaux. Il s'agit de déterminer les formules appropriées pour calculer la dépréciation économique du capital environnemental détérioré en raison d'une « sur-utilisation ».

Un des avantages de notre méthode est que le gaspillage ou la détérioration du capital environnemental y est traité de façon analogue au gaspillage ou à la détérioration des stocks de ressources épuisables ou des stocks de ressources renouvelables comme le poisson et les forêts [voir par exemple Hartwick, 1990]. Les formules que nous avons obtenues sont dérivées de modèles explicites de la théorie du capital ou de la théorie de la croissance et ne sont pas simplement les fruits de l'intuition[1].

Premièrement, nous définissons un modèle dynamique simple d'une économie où il y a production de « blé » et production d'un sous-produit polluant. Nous analysons les différents aspects de ce modèle, y compris son expansion pour y inclure un secteur englobant les moyens de lutte contre la

pollution créés par l'homme. Nous dérivons ensuite des formules pour calculer la dépréciation économique du capital environnemental, c'est-à-dire que nous cherchons à élargir le cadre des méthodes de comptabilité nationale pour intégrer la diminution ou la détérioration des stocks de capital environnemental. Nous nous éloignons de notre modèle ricardien simple avec pollution pour considérer un modèle assez général qui nous permet de voir comment les formules de dépréciation économique changent selon la façon dont on traite les effets de la pollution sur l'économie.

Théorie du capital et pollution : un modèle de base

Supposons, dans un monde ricardien composé d'une terre exploitée par des travailleurs disponibles en nombre infini et rémunérés au salaire de subsistance w, que la production de blé s'accompagne de pollution. Cette pollution détériore la terre agricole et « se résorbe » à un taux constant dans le temps. Quelle quantité de main-d'œuvre devrait-on utiliser pour exploiter la terre ? La réponse dépend du degré de détérioration de la terre à un moment donné. La production de blé engendre de la pollution et celle-ci détériore la terre servant à produire le blé. Ainsi, nous avons un modèle intrinsèquement dynamique de la production de « blé ». Une solution possible serait, de toute évidence, une variante d'un état stationnaire, où le stock de pollution resterait constant (comme la main-d'œuvre et la production) tandis que la nouvelle pollution correspondrait à la pollution « éliminée ». Une autre solution pourrait comporter un cycle caractérisé par une détérioration croissante de la terre, une baisse de la main-d'œuvre, le rétablissement de la fertilité du sol, un accroissement de la production et de la détérioration du sol, une diminution de la main-d'œuvre, et ainsi de suite. Le cycle pourrait se répéter à l'infini, comme dans le modèle prédateur-proie de Lotka-Volterra, ou pourrait converger vers un état stationnaire. Une autre possibilité serait l'exploitation « abusive » du sol, en laissant la pollution s'accumuler et la main-d'œuvre décroître de façon asymptotique jusqu'à un moment indéfini. Par conséquent, le simple prolongement du modèle simple de Ricardo à un monde dynamique de pollution et de lutte contre la pollution fait surgir toute une série de scénarios donnant matière à réflexion.

Nous définirons d'abord le modèle, après quoi nous examinerons certaines de ses propriétés et tenterons d'esquisser certains de ses éléments dynamiques.

Sur une terre d'une superficie donnée, la quantité de blé Q est produite par une main-d'œuvre N, et cette production est entravée par un stock de pollution R (résidus).

$$Q = f(N, R)$$

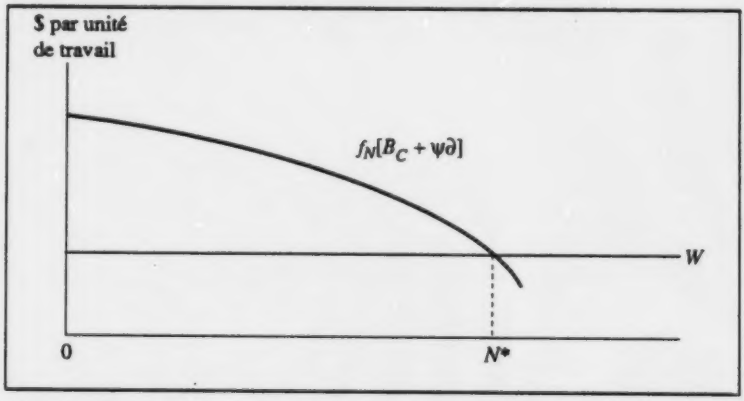
où

$$f_N > 0 \text{ et } f_{NN} < 0,\ f(0, R) = 0 \text{ et } f_R < 0,\ f_{RR} > 0 \text{ et } f(N, 0) > 0. \quad (1)$$

La main-d'œuvre est disponible en quantité infinie au taux de rémunération w. Étant donné R à un niveau positif donné, l'équilibre atteint pourrait être celui du graphique 1.

Graphique 1

Solution d'état stationnaire possible étant donné un stock de pollution constant, c'est-à-dire où les nouvelles hausses de pollution sont égales à la quantité éliminée par la nature



NOTE N correspond à la main-d'œuvre employée pour produire le blé.

À un niveau plus élevé du stock de pollution R, il y a diminution de la valeur du produit marginal du travail, comme nous l'avons reproduit au graphique 1, ce qui signifierait un niveau inférieur de la main-d'œuvre N^* employée à l'état stationnaire. Notons que c'est la valeur du produit marginal *net* du travail qui égale le taux de rémunération, c'est-à-dire le produit marginal du travail moins la pollution supplémentaire causée à la marge par l'accroissement de la production Q. La taxe optimale requise pour que le prix de la main-d'œuvre sur le marché w soit égal à la valeur fictive du travail est $-f_N\Psi\gamma$ où $\Psi < 0$. À la marge, une unité de travail produit non seulement un volume de production (de blé) valant B_C par unité, mais « produit » aussi de la pollution au niveau $-f_N\Psi\gamma$ par unité de travail. $B(C)$ est le surplus global du consommateur correspondant à la consommation C.

La réduction naturelle du taux de pollution correspond à $-\dot{R} = bR$ où b est le taux de détérioration exponentiel du stock. Nous supposons que b est positif

et inférieur à 1. La production génère une nouvelle pollution $\dot{R}$ selon l'équation $\gamma f(N, R) = \dot{R}$ où γ est constant et > 0. La variation nette du stock de pollution est :

$$\dot{R} = -bR + \gamma f(N, R). \tag{2}$$

Dans un état stationnaire, $\dot{R} = 0$, ce qui veut dire que la dépollution naturelle $-bR$ est égale à la nouvelle hausse de la pollution $\gamma f(N, R)$. Dans un cycle perpétuel, R oscillera entre deux valeurs R_U^* et R_L^*, ce qui fera osciller la main-d'œuvre entre deux valeurs, soit N_L^* et N_U^*. Enfin, dans le scénario d'un effondrement du système, $\dot{R}$ est > 0 et R continue de croître à mesure que N diminue indéfiniment.

Le propriétaire de la terre ou celui qui en planifie l'exploitation maximise $\int_0^{\infty} [B(C(t)) - wN(t)]e^{-\rho t}dt$, qui correspond à la valeur actualisée du surplus (rente foncière plus surplus du consommateur) du propriétaire[2]. $C(t)$ est la consommation de blé et équivaut à $f(N, R)$. Nous ne tenons pas compte des coûts de réensemencement, ni de l'investissement annuel pour la semence de la période suivante. L'équation de changement est donnée par l'équation (2) ci-dessus. La valeur hamiltonienne actuelle de ce problème est :

$$H = B(f(N, R)) - wN + \Psi[\gamma f(N, R) - bR]. \tag{3}$$

Les équations canoniques sont :

$$\frac{\partial H}{\partial N} = 0 \rightarrow \left[B_C + \Psi\gamma\right] f_N = w; \tag{4}$$

$$-\frac{\partial H}{\partial R} = \dot{\Psi} - \Psi\rho \rightarrow -B_C f_R - \Psi\gamma f_R + b\Psi = \dot{\Psi} - \Psi\rho; \tag{5}$$

$$\frac{\partial H}{\partial \Psi} = \dot{R} \rightarrow \dot{R} = \gamma f(N, R) - bR. \tag{6}$$

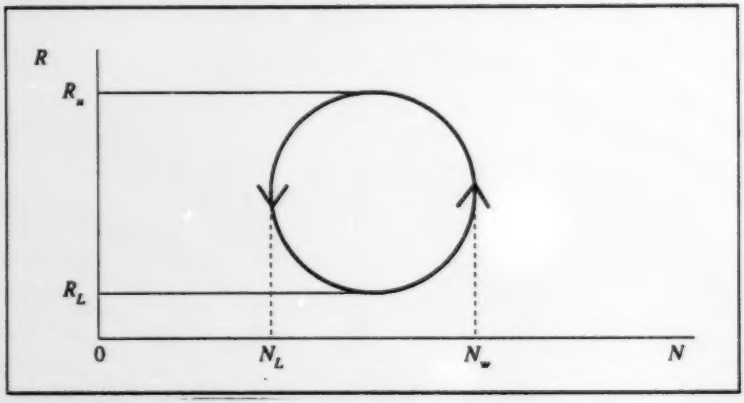
Nous supposons que Ψ est négatif dans un état stationnaire. Il s'agit du prix fictif du stock de pollution R. Par conséquent, $[B_C + \Psi\gamma]$ est le prix net du blé, déduction faite de la pollution induite par la production accrue, et $[B_C + \Psi\gamma]f_N$ est la valeur nette du produit marginal du travail. Si nous solutionnons pour Ψ dans (4) et que nous obtenons

$$\dot{\Psi}\left[= \left\{\left(-f_N^2 \frac{\partial B_C}{\partial N} - wf_{NN}\right)/\gamma f_N^2\right\}\dot{N} + \left\{\left(-f_N^2 \frac{\partial B_C}{\partial R} - wf_{NR}\right)/\gamma f_N^2\right\}\dot{R}\right],$$

nous pouvons substituer cette valeur dans (5) pour obtenir alors une paire d'équations différentielles simultanées en R et N. La solution de cette paire d'équations définit les propriétés dynamiques du modèle étant donné une valeur initiale R_0 du stock de pollution. Récapitulons. Les trois scénarios dynamiques possibles sont : i) le système converge vers un état stationnaire (R^*, N^*), ii) le système suit un cycle perpétuel entre les valeurs R_U, N_L, R_L et N_U, et iii) le système s'effondre et $N(t) \to 0$ à mesure que $t \to \infty$. Nous reproduisons le scénario du cycle[3] dans le graphique 2. (Un état stationnaire est représenté au graphique 1.)

Graphique 2

Un cycle perpétuel possible d'expansion-contraction de la pollution à partir du modèle simple de Ricardo



Pour comprendre le modèle, nous avons défini des paramètres pour un certain nombre de formes fonctionnelles et les avons testées en statique comparative, en perturbant l'état stationnaire N et R. Nous avons choisi une fonction de production du blé de la forme N^{α}/R^{β} avec $U(C) = C^{0,5}$. Dans notre scénario de référence, $\alpha = 0{,}5$, $\beta = 0{,}001$, $\gamma = 0{,}1$, $\rho = 0{,}05$, $b = 0{,}5$ et $w = 0{,}1$. Nous avons obtenu les résultats suivants :

W	↑	→	R	↓,	N	↓;
γ	↑	→	R	↑,	N	↓;
β	↑	→	R	↑,	N	↑;
b	↑	→	R	↓,	N	↑;
ρ	↑	→	R	↓,	N	↑.

À noter que lorsque la production fait augmenter la pollution ($\gamma \uparrow$), l'état stationnaire correspond à un stock de pollution plus élevé et à une diminution du nombre de travailleurs employés. Lorsque le stock de pollution a un effet plus défavorable sur la production ($\beta \uparrow$), il y a augmentation du niveau du stock de pollution à l'état stationnaire ainsi que du nombre de travailleurs, même si la production Q diminue. Lorsque la nature intervient pour réduire davantage la pollution ($b \uparrow$), le stock de pollution à l'état stationnaire est moins élevé et il y a augmentation de la main-d'œuvre utilisée. Du point de vue de la politique, il serait souhaitable d'abaisser γ, la quantité de pollution engendrée par unité de blé produite. Une diminution de la valeur de γ abaisse le stock de pollution de l'état stationnaire et fait augmenter le nombre de travailleurs. Dans le modèle qui suit, γ est une variable instrumentale, mais les valeurs plus faibles de γ occasionnent de plus grands coûts de mise en œuvre que les valeurs plus élevées.

Un monde ricardien pollué avec moyens de lutte contre la pollution conçus par l'homme

Nous introduisons dans le modèle des moyens de lutte contre la pollution conçus par l'homme en supposant qu'il est possible de réduire la valeur de γ par des investissements dans γ. Autrement dit, la production engendrera moins de pollution nouvelle si la valeur de γ est fixée à un niveau moins élevé. Nous introduisons tout simplement l'« investissement » $g(\gamma)$ dans l'équation comptable en posant $Q = C + g(\gamma)$ où $g_\gamma < 0$ (en d'autres termes, une valeur moins élevée de γ est plus coûteuse à maintenir). La nouvelle fonction objective devient $\int_0^{\infty} [B[f(N,R) - g(\gamma)] - wN]e^{-\rho t}dt$, l'équation de changement restant la même. Il y a maintenant deux variables de contrôle, N et γ, et une variable d'état, soit R. Nous avons donc trois équations différentielles simultanées en N, γ et R pour définir les propriétés dynamiques du système.

La valeur hamiltonienne actuelle est maintenant

$$H = B[f(N,R) - g(\gamma)] - wN + \eta[\gamma f(N,R) - bR], \tag{7}$$

où η est la variable d'état connexe ou le coût fictif actuel de R. Les équations canoniques sont :

$$\frac{\partial H}{\partial N} = 0 \rightarrow \left[B_C + \eta\gamma\right] f_N = w; \tag{8}$$

$$\frac{\partial H}{\partial \gamma} = 0 \rightarrow -B_C g_\gamma + \eta f(N,R) = 0; \tag{9}$$

$$-\frac{\partial H}{\partial R} = \dot{\eta} - \eta\rho \rightarrow -B_C f_R - \eta\gamma f_R + b\,\eta = \dot{\eta} - \eta\rho; \tag{10}$$

$$\frac{\partial H}{\partial \eta} = \dot{R} \rightarrow \dot{R} = \gamma f\,(N,\ R) - bR\,. \tag{11}$$

Le prix net du blé est maintenant $B_C + \eta\gamma$, où η est négatif, et le calcul de la valeur nette s'impose parce qu'une plus grande production suppose une hausse de la pollution produite. On peut voir que le prix fictif η est égal à $B_C g\gamma / f\,(N, R)$ où $g\gamma < 0$. Étant donné cette expression pour η, nous pouvons résoudre le système pour $\dot{\eta}$ et substituer les valeurs obtenues pour η et $\dot{\eta}$ dans les équations (8) et (10) et ainsi obtenir trois équations différentielles simultanées en γ, N et R. La solution à l'état stationnaire comporterait des valeurs positives et constantes dans le temps pour γ, N et R. L'analyse détaillée de ce modèle devra faire l'objet d'une autre étude parce qu'il est passablement plus compliqué que le précédent modèle où il n'y a pas de dépollution par l'homme.

Dépréciation économique du capital environnemental

Weitzman [1976] et d'autres auteurs ont signalé que la valeur hamiltonienne actuelle dans la théorie néo-classique de la croissance globale correspondait, sous réserve d'une renormalisation mineure, au PNN d'une économie. Le PNN comprend entre autres éléments les augmentations nettes de la valeur des biens d'équipement produits (l'investissement net). Mais lorsque la croissance dans un modèle néo-classique incorpore le capital environnemental, l'« investissement » net comprend la dépréciation économique (les pertes de valeur) de ces biens d'équipement environnementaux. L'optimisation dynamique débouche sur la valeur au marché ou la valeur de rareté de tous les changements pouvant survenir dans les stocks de capital. Ainsi, nous aboutissons à des méthodes nous permettant de mesurer avec exactitude le PNN, c'est-à-dire d'arriver à une mesure qui tient compte de la perte de valeur des stocks de capital environnemental attribuable à un accroissement de la pollution durant l'exercice comptable, disons une période d'un an.

Nous allons prendre trois variantes de cette approche – chacune étant fonction du secteur de l'économie où la pollution fait sentir ses effets et de l'origine des activités de lutte à la pollution. D'abord, nous considérons le cas où il n'y a pas d'activités de dépollution d'origine humaine et où le stock de pollution a des effets négatifs sur la fonction de production, comme dans notre modèle ricardien simple. Nous envisageons ensuite le cas où il y a des activités de lutte contre la pollution et où le stock de pollution a encore une incidence négative sur la fonction de production. Enfin, nous introduisons des effets attribuables à la pollution sur les activités de consommation ou sur la fonction d'utilité. Nous ajoutons un « effet » à chaque étape. Nous pouvons

constater 1) qu'il est justifié, dans l'une des variantes, de déduire les coûts de réduction de la pollution du PNB [voir par exemple Peskin, 1976] et 2) qu'il y a déduction des rentes sur le capital environnemental dans une autre variante. La déduction des rentes sur les ressources épuisables a été introduite dans le modèle de Solow [1986], ainsi que dans celui de la présente étude, et elle est analysée plus en détail dans Hartwick [1989] et Hartwick et Lindsey [1989]. Voir aussi Kemp et Long [1982].

Le PNN et la dépréciation économique du capital environnemental

Nous considérerons le volume de pollution X, apparenté à un stock, comme un intrant dans la production. Pour des intrants donnés K et L, une augmentation de la pollution s'accompagnera d'une baisse de la production dans $F(K, L, X)$[4]. En outre, la production de ce bien composite ajoute de la pollution, c'est-à-dire qu'elle donne lieu à un $\dot{X}$ positif. Les hausses nettes de pollution sont $\dot{X} = -bX + \gamma F(K, L, X)$ où, en l'absence de production (une fonction $F(\,)$ positive), $\dot{X} = -bX$, c'est-à-dire que la pollution « s'élimine » au taux b par régénération naturelle du stock environnemental. γ est un paramètre reliant la production aux augmentations de la pollution. Le problème global de planification comporte une seule variable de contrôle, soit C, et deux variables d'état, K et X, et revient à maximiser $\int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(C)\,dt$ sous les contraintes $\dot{K} = F(K, L, X) - C$ et $\dot{X} = -bX + \gamma F(K, L, X)$ où ρ est le taux d'escompte social et C est la consommation globale. $X(0)$, $K(0)$ et $L(0)$ sont fixés de façon exogène. La valeur hamiltonienne actuelle du système est :

$$H(t) = U(C) + \phi(t) \cdot [F(K, L, X) - C] + \Psi(t) \cdot [-bX - \gamma F(K, L, X)]. \qquad (12)$$

Les équations canoniques sont :

$$\frac{\partial H}{\partial C} = 0 \text{ ou } U_C = \phi(t); \qquad (13)$$

$$\dot{\phi} = \rho\phi - \frac{\partial H}{\partial K} \text{ ou } \dot{\phi} = \rho\phi - \phi F_K + \Psi\gamma F_K; \qquad (14)$$

$$\dot{\Psi} = \rho\Psi - \frac{\partial H}{\partial X} \text{ ou } \dot{\Psi} = \rho\Psi - \phi F_X + \Psi\gamma F_X + \Psi b; \qquad (15)$$

$$\dot{K} = \frac{\partial H}{\partial \phi} \text{ ou } \dot{K} = F(K, L, X) - C; \qquad (16)$$

$$\dot{X} = \frac{\partial H}{\partial \Psi} \text{ ou } \dot{X} = -bX + \gamma F(K, L, X). \qquad (17)$$

Pour voir que $H(t)$ est la fonction correspondant au PNN, nous posons que $U(C) = C \cdot U_C$, nous constatons que $U_C = \phi$ et divisons le tout par U_C pour obtenir

$$\frac{H(t)}{U_C} = C + \dot{K} + \frac{\Psi}{U_C}\dot{X}$$

c'est-à-dire que le PNN comprend la dépréciation économique du capital environnemental représentée par $(\Psi/U_C)\dot{X}$. À l'aide des équations canoniques, on obtient en outre

$$\Psi/U_C = \left[\frac{\frac{-\dot{U}_C}{U_C} + \rho - F_K}{\gamma F_K}\right] \equiv V.$$

À noter que $V\dot{X}$ est la dépréciation exprimée en termes de stock de pollution plutôt qu'en termes de stock de capital environnemental. Il s'agit d'une façon utile de modéliser les ressources environnementales.

En l'absence de pollution, $V = 0$ parce que le numérateur de V est nul. Le numérateur est exprimé en unités de *taux de rendement* et F_K est le taux de rendement du capital dans cette économie polluée. Donc, le numérateur introduit un écart dans le taux de rendement et le dénominateur est *le* taux de rendement pondéré par le paramètre γ. Ainsi, la rente nette, V, d'une unité du stock de pollution est représentée par un écart en pourcentage dans le taux de rendement sur le capital produit K, à savoir F_K. Rappelons que les variables d'état connexe représentent $\partial J(t)/\partial\alpha$ où α est une variable d'état et $J(t)$ est la valeur du programme optimal à compter de t jusqu'à la fin du programme. Par conséquent, $\Psi(t) = \partial J(t)/\partial X(t) < 0$ étant donné qu'un plus grand stock de X réduit la valeur du programme. $\Psi(t)$ est exprimé en unités d'utilité et $\Psi(t)/U_C$ est le même concept, mais exprimé en unités du bien composite produit.

Dans la formulation précédente, la pollution n'était contrôlée qu'indirectement par les décisions de production des producteurs. Une production accrue faisait augmenter la pollution d'un stock X et la pollution ralentissait la production en ce sens que les mêmes quantités de K et L donnaient une moins grande production pour des niveaux plus élevés de X. X était, en théorie, une variable d'état et il n'y avait pas de variable de contrôle correspondant à X ou agissant directement sur X. Dans le cas du capital environnemental, notre terme pour la dépréciation économique faisait intervenir des taux de rendement et non des prix desquels le coût marginal aurait été soustrait. Supposons maintenant que nous reformulons le modèle en introduisant une mesure de contrôle de la pollution. Ne pourrions-nous pas observer alors la dépréciation économique sous une forme correspondant à un prix moins le coût marginal ? En effet, si nous introduisons les coûts de réduction de la pollution $f(\gamma)$ sous la forme d'un montant débité de la production du bien composite, une valeur

moins élevée de γ supposant moins de nouvelle pollution par unité de production composite, notre valeur hamiltonienne actuelle devient alors :

$$H(t) = U(C) + \phi(t) \cdot [F(K, L, X) - C - f(\gamma)] + \Psi(t) \cdot [-bX + \gamma F(K, L, X)] \quad (18)$$

où C et b ne sont pas des variables de contrôle. À partir de $\partial H/\partial C = 0$, nous obtenons $U_C = \phi$ et de $\partial H/\partial b = 0$, nous obtenons $f'\phi = F\Psi$. Alors $\frac{\Psi}{U_C} = \frac{f'}{F} < 0$ parce que $f' < 0$ et que la dépréciation économique s'exprime par $\frac{\Psi}{U_C}\dot{X} = \frac{f'\dot{X}}{F}$ où f' est le coût marginal à supporter pour diminuer le flux de pollution en investissant dans le « capital » de lutte contre la pollution, qui est fonction de γ.

Le terme générique de la dépréciation économique est $[p-mc]\dot{S}$ où $\dot{S}$ représente la diminution du stock de ressources naturelles. Dans notre scénario, $\dot{X}$ (pollution accrue) représente la diminution du capital environnemental. Nous n'avons pas de prix ici, de sorte que $(\Psi/U_C)\dot{X}$ devrait être interprété comme $[-mc]\dot{S}$. f' $(= df/d\gamma < 0)$ est un coût marginal et $\dot{X}/F$ est la diminution du stock exprimée en « unités γ ». Alors, $f'\dot{X}/F$ correspond à la mesure de $\dot{X} > 0$ en unités additionnelles de production composite perdue.

Ce résultat explique, dans le contexte de la théorie du capital, pourquoi il faut déduire du PNB les dépenses de contrôle de la pollution pour arriver au PNN [voir par exemple Bartelmus, Stahmer et van Tongeren, 1989]. À noter, toutefois, que les coûts de contrôle de la pollution sont exprimés sous la forme d'un accroissement de la pollution, $\dot{X}$, multiplié par le coût marginal de la réduction d'une unité de stock X. Cela est nettement différent des calculs utilisant les ressources présentement consacrées au contrôle de la pollution, ce qui a été proposé par beaucoup de gens [par exemple Peskin, 1976]. Rappelons que Nordhaus et Tobin [1972, p. 49] ont soustrait d'une façon un peu spéciale la détérioration environnementale causée par la pollution. Si $\dot{X} < 0$, autrement dit si la pollution diminue, alors la dépréciation économique devient positive $\frac{f'\dot{X}}{F} > 0$ et représente maintenant une appréciation du capital ou un investissement, le capital étant ici le stock de capital environnemental *propre*.

Désutilité de la pollution

Usher [1981, p. 130-134] présente un argument convaincant contre l'incorporation de la pollution dans la fonction d'utilité comme on le fait dans $U(C, X)$.

Son argument pourrait être désigné le « problème de l'ensoleillement ». Il n'est pas logique de mettre du soleil dans $U(\ )$, ou l'amour de Dieu, etc., tant que ces stocks sont *invariables*. Il en va de même du stock de pollution. Mais il semble raisonnable d'affirmer que le bien-être des gens se détériore lorsque X augmente ou qu'il s'améliore lorsque X diminue. Cela justifierait donc de faire entrer dans U les changements qui surviennent dans X, si nous jugeons que la pollution a une incidence directe sur la consommation ou l'utilité en plus d'avoir des effets nuisibles sur la production[5]. Supposons alors que nous révisions notre fonction $U(C)$ ci-dessus pour y incorporer les changements qui surviennent dans le stock de pollution, $\dot{X} = -bX + \gamma F(K, L, X)$. Notre valeur hamiltonienne actuelle devient alors :

$$H(t) = U(C, \gamma F(K, L, X) - bX) + \phi(t) \cdot [F(K, L, X) - C - f(\gamma)] + \Psi(t) \cdot [-bX + \gamma F(K, L, X)]. \tag{19}$$

À partir des relations $\frac{\partial H}{\partial C} = 0$ et $\frac{\partial H}{\partial b} = 0$, nous obtenons $\frac{\Psi}{U_C} = \frac{-U_{\dot{X}}}{U_C} + \frac{f'}{F}$

où $-U_X / U_C$ est le prix des hausses de pollution, qui est positif parce que $U_X < 0$ pour $\dot{X} > 0$ et $\frac{f'}{F} < 0$, comme nous l'avons noté plus haut. Par conséquent, $\frac{\Psi}{U_C}$ est le prix de la pollution additionnelle moins le coût marginal de la pollution additionnelle et cette rente sera négative parce que $\Psi(t) < 0$.

Ainsi $\frac{-f'}{F} + \frac{U_{\dot{X}}}{U_C} > 0$ et la dépréciation économique est $\frac{\Psi(t)}{\phi(t)} \dot{X} \equiv -\left[\frac{U_{\dot{X}}}{U_C} - \frac{f'}{F}\right] \dot{X} < 0$ pour $\dot{X} > 0$, valeur qui devrait être ajoutée au PNB pour obtenir la valeur réduite correcte du PNN. Étant donné que X est un « mal » de capital (par opposition à un « bien » de capital), notre résultat est l'image exactement inverse des résultats obtenus pour les ressources épuisables. Le signe change. Ailleurs, la dépréciation économique était $[p - mc]\,\dot{\alpha}$ où α était un bien de capital, $\dot{\alpha}$ était négatif et $p - mc$ était une rente positive par unité de réduction du stock. Dans le cas ci-dessus, nous avons $[p - mc]\,\dot{X}$ où $\dot{X}$ est positif et où $[p - mc]$ est négatif puisque X (le stock de pollution) est un « mal ».

Dans l'analyse qui précède, X et $\dot{X}$ entraient directement dans le vaste problème de l'optimisation intertemporelle et avaient donc comme prix les valeurs de rareté ou valeurs fictives appropriées. Le PNN avait la bonne valeur

compte tenu des prix fictifs F_X, $\frac{df}{dg}$, et U_X/U_C. Dans les économies du monde réel, il n'y a généralement pas de lien direct entre les prix et les variables de pollution. En général, le stock de pollution sera excessif parce que l'on n'impose pas de frais appropriés pour l'utilisation des bassins atmosphériques et hydrographiques. Il est très difficile de passer de nos valeurs théoriques idéales à des évaluations concrètes. Lorsque les prix des intrants ne sont pas fixés au niveau approprié, on produit des quantités incorrectes à des prix incorrects. Les services de capital environnemental qui n'ont aucun prix ou dont le prix est inférieur à leur vraie valeur seront en général des intrants auxquels on attribuera un mauvais prix. En pratique, il faut donc rajuster le PNB afin de tenir compte de prix implicitement corrects pour les produits et, ensuite, soustraire la valeur appropriée de la dépréciation du capital environnemental. Les tendances observées dans un PNN corrigé seraient un meilleur indicateur de l'évolution du bien-être d'un pays dans le temps que, par exemple, un PNN non rajusté pour tenir compte de la dépréciation du stock de ressources naturelles.

Annexe : Peskin au sujet de la comptabilité et de la pollution

Dans Peskin [1976][6], le pollueur utilise l'environnement à son profit et la valeur de cet avantage est représentée par EA_i pour un secteur polluant i. Les pertes pour les consommateurs ou les personnes subissant la pollution (qui peuvent comprendre les pollueurs eux-mêmes) sont évaluées à R_i. Par conséquent, $NEB_i = EA_i - R_i$ est la « valeur nette de l'actif environnemental ». (Cette terminologie porte à confusion étant donné que Peskin fait la distinction entre la taille d'un actif, désigné A, et les résidus que cet actif peut produire, $r(A)$. Son analyse montre que EA_i est l'avantage r que retirent les pollueurs et que R_i est le désavantage r causé à ceux qui subissent la pollution.) Peskin soutient que EA_i et R_i peuvent être évalués sous forme de totaux ou de valeurs marginales pondérées par des quantités. D'abord, Peskin propose de faire tout simplement la somme des NEB_i pour tous les i et d'ajouter la valeur obtenue au PNB. Selon lui, les flux environnementaux qui ne comportent pas de prix devraient être ajoutés au PNB et, ensuite, la valeur des dommages causés par ces flux devrait être déduite du PNB préalablement gonflé. Ces conclusions sont certainement semblables à celles que nous avons dégagées de notre analyse fondée sur la théorie du capital. Peskin invoque un argument portant sur le niveau optimal de résidus r_i pour voir si EA_i est supérieur ou inférieur à R_i. Outre les arguments fondés sur le « niveau optimal », le signe dépendra de la méthode utilisée, c'est-à-dire selon qu'on calculera les totaux ou les valeurs marginales. Rappelons que dans l'optique de la théorie du capital que nous avons employée, nous proposons d'ajouter une valeur au PNB observé pour tenir compte des services ne comportant pas de prix ou des services sous-évalués tirés du capital environnemental. Nous proposons ensuite de soustraire de ce PNB rajusté la valeur de la dépréciation économique associée à l'augmentation nette des niveaux de pollution matérielle de l'air et de l'eau. À noter que notre méthode de la théorie du capital repose essentiellement sur les niveaux de résidus dans les bassins atmosphériques et hydrographiques (une notion de stock) et sur la variation de ces niveaux (ajustement du stock, c'est-à-dire plus ou moins de résidus par rapport aux niveaux actuels). Nous obtenons des prix fictifs explicites pour ces valeurs représentant des conditions d'équilibre. Pour évaluer r_i, Peskin a recours à des tableaux d'avantages et de dommages marginaux déterminés de façon exogène. Ces quantités s'apparentent à des récoltes annuelles en ce sens que, chaque année, une certaine série de r_i est produite; ces séries peuvent varier d'une année à l'autre, mais les changements observés sont sans importance. L'évaluation est fondée sur ces niveaux. Notre approche est intrinsèquement dynamique en ce sens que les stocks de résidus et les variations des stocks sont des quantités essentielles dans le processus d'évaluation.

Notes

1 Usher [1981], Ward [1982], El-Serafy [1981], Eisner [1988] et Repetto [1989] traitent de façons d'ajuster le PNB pour tenir compte de l'utilisation des ressources épuisables.

2 Les modèles dynamiques de production avec pollution utilisaient les données des années 60. Plourde [1972] et Forster [1973, 1975] ont fait des travaux utiles dans ce domaine. Les phénomènes stochastiques dans un modèle dynamique sont analysés dans Plourde et Yeung [1989].

3 Clark [1976, section 6.5] présente une introduction facile à comprendre sur les cycles considérés comme des processus limitatifs dans des modèles dynamiques. Hartl [1987] montre formellement qu'il ne peut y avoir de cycles limitatifs dans les modèles où il n'y a qu'une seule variable d'état, comme celui que nous avons défini précédemment. En ajoutant le capital produit au modèle, on obtiendrait un modèle à deux états.

4 Martin [1986] analyse en détail les complications attribuables à l'existence d'un élément nuisible dans la fonction de production. Dans ce cas, les isoquants n'ont pas les propriétés habituelles.

5 Le problème de l'ensoleillement d'Usher s'inscrit dans la tradition des modèles qui évaluent le bien-être courant en termes de flux (de consommation) plutôt qu'en termes de stock (de richesse). Le stock de pollution appartient à la deuxième catégorie. Si la pollution (stock) augmente de façon régulière avec le temps, chacun de ces concepts se traduira par une diminution de $U(C, \cdot)$ pour C constant. Le principal argument invoqué par Usher pour justifier la nécessité de laisser tout à fait de côté les éléments de richesse comme l'ensoleillement, c'est que cette méthode donne des résultats imprévus dans le calcul du bien-être dans le temps [Usher, 1981, p. 130-134]. Mais dans les comparaisons intersectorielles ou internationales du bien-être, il est tout à fait indiqué de faire intervenir des stocks dans $U(\,)$, en particulier les stocks de polluants qui se trouvent dans l'air et dans l'eau. Il n'est pas faux de dire que l'analyse internationale du bien-être diffère à bien des égards de l'analyse purement intertemporelle du bien-être à l'intérieur d'une économie donnée. Le cadre élaboré par Weitzman [1976] et Solow [1986] s'applique essentiellement à l'analyse intertemporelle du bien-être et c'est ce cadre qui a été retenu pour les fins de la présente étude. Plourde et Forster ont toutefois introduit des niveaux de stock de pollution dans la fonction d'utilité.

6 Peskin [1981] commence par une très longue introduction dans laquelle l'environnement est une forme de capital qui peut être épuisé en

conséquence d'une pollution excessive. L'analyse comptable présentée dans la partie principale de cette étude correspond à la méthode comptable figurant dans Peskin [1976]. Dans ce dernier ouvrage, on retrouve une analyse explicite de la « dépréciation de l'actif environnemental » [voir aussi Eisner, 1988, p. 1674].

Bibliographie

Bartelmus, P., C. Stahmer et J. van Tongeren [1989], « SNA framework for integrated environmental and economic accounting », document présenté à l'Association internationale de recherches sur le revenu et la fortune, Lahustein, Allemagne de l'Ouest, août.

Clark, C. [1976], *Mathematical Bioeconomics*, New York, Wiley.

Dasgupta, P. [1982], *The Control of Resources*, Oxford, Basil Blackwell.

Eisner, Robert [1988], « Extended accounts for national income and product », *Journal of Economic Literature*, vol. 26, décembre, p. 1611-1684.

El-Serafy, S. [1981], « Absorptive capacity, the demand for revenue, and the supply of petroleum », *Journal of Energy and Development*, vol. 7, n° 1, automne.

Forster, B. A. [1973], « Optimal consumption planning in a polluted environment », *Economic Record*, vol. 49, p. 534-545.

_____ [1975], « Optimal pollution control with a non-constant exponential rate of decay », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 2, p. 1-6.

Hartl, R. [1987], « A simple proof of the monotonicity of the state trajectories in autonomous control problems », *Journal of Economic Theory*, vol. 41, p. 211-215.

Hartwick, J. M. [1989], *Non-renewable Resources: Extraction Programs and Markets*, Londres, Harwood Academic Publishers.

_____ [1990], « Natural resources, national accounting and economic depreciation », document de discussion n° 721, Département d'économique, Université Queen's, à paraître dans le *Journal of Public Economics*.

Hartwick, J. M. et R. Lindsey [1989], « NNP and economic depreciation of exhaustible resource stocks », document de discussion n° 741, Département d'économique, Université Queen's.

Kemp, M. C. et N. V. Long [1982], « On the evaluation of national income in a dynamic economy: Variations on a Samuelsonian theme », paru dans *Samuelson and Neoclassical Economics*, ouvrage publié sous la direction de G. Feiwell, Boston, Martinus Nijhoff Publishing Co., p. 185-189.

Martin, R. E. [1986], « Externality, regulation and the monopoly firm », *Journal of Public Economics*, vol. 29, p. 347-362.

Nordhaus, W. et J. Tobin [1972], « Is growth obsolete? », paru dans *Economic Growth*, compte rendu du V^e colloque tenu lors du cinquantième anniversaire du National Bureau of Economic Research, New York, NBER.

Peskin, H. M. [1976], « A national accounting framework for environmental assets », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 2, n° 4, avril, p. 255-262.

_____ [1981], « National income accounts and the environment », *Natural Resources Journal*, vol. 21, n° 3, juillet, p. 511-537.

_____ [1986], manuscrit d'ouvrage sans titre portant sur les comptes nationaux.

Plourde, C. G. [1972], « A model of waste accumulation and disposal », *Canadian Journal of Economics*, vol. 5, p. 115-125.

Plourde, C. G. et David Yeung [1989], « A model of industrial pollution in a stochastic environment », *Journal of Environmental Economics and Management*.

Repetto, Robert [1989], « Nature's resources as productive assets », *Challenge*, septembre/octobre, p. 16-20.

Solow, R. M. [1986], « On the intergenerational allocation of natural resources », *Scandinavian Journal of Economics*, vol. 88, n° 1, p. 141-149.

Usher, D. [1981], *The Measurement of Economic Growth*, Oxford, Blackwell.

Ward, M. [1982], « Accounting for the depletion of natural resources in the national accounts of developing countries », Centre de développement de l'OCDE.

Weitzman, M. L. [1976], « On the welfare significance of national product in a dynamic economy », *Quarterly Journal of Economics*, vol. 90, p. 156-162.